

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Львівський національний університет імені Івана Франка**  
**Фізичний факультет**  
**Кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука**

**Затверджено**

На засіданні кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка (протокол № 1 від 29.08.2024 р.)

Завідувач кафедри  Володимир ТКАЧУК

**Силабус**  
**з навчальної дисципліни «Електродинаміка»,**  
**що викладається в межах**  
**ОПП «Комп'ютерні технології у прикладній фізиці»**  
**та ОПП «Нанофізика та наноматеріали»**  
**першого (бакалаврського) рівня вищої освіти**  
**для здобувачів з спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали**

**Львів 2024**

<b>Назва дисципліни</b>	Електродинаміка
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	вул. Драгоманова, 12, 79005, м. Львів
<b>Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна</b>	фізичний факультет, кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука
<b>Галузь знань, шифр та назва спеціальності</b>	Галузь знань — 10 Природничі науки Спеціальність — 105 Прикладна фізика та наноматеріали
<b>Викладачі дисципліни</b>	професор кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, д.ф.-м.н., проф. Ровенчак Андрій Адамович
<b>Контактна інформація викладачів</b>	<a href="mailto:andrij.rovenchak@lnu.edu.ua">andrij.rovenchak@lnu.edu.ua</a> ; <a href="mailto:andrij.rovenchak@gmail.com">andrij.rovenchak@gmail.com</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/rovenchak-a-a">https://physics.lnu.edu.ua/employee/rovenchak-a-a</a>
<b>Консультації з курсу відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Zoom, Microsoft Teams, Skype.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/elektrodynamika-prykladna-fizyka">https://physics.lnu.edu.ua/course/elektrodynamika-prykladna-fizyka</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Електродинаміка» є нормативною і розрахована на слухачів спеціальності «105 Прикладна фізика та наноматеріали» освітнього рівня бакалавра. Її викладають у V–VI семестрах в обсязі 5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Курс розроблено таким чином, щоб стисло подати основи класичної та релятивістської електродинаміки, спеціальної теорії відносності, електродинаміки середовища.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою і завданням навчальної дисципліни «Електродинаміка» є формування в майбутнього фізика цілісної картини фізичних явищ, пов'язаних із електромагнітним полем. Це передбачає виклад основ теорії електромагнітних процесів у вакуумі та в середовищі, поглиблення знань, одержаних в загальному курсі «Електрика», засвоєння математичного апарату класичної теорії поля, вивчення теорії електромагнітного поля Максвелла–Лоренца і релятивістської теорії електромагнітного поля.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> 1. В. А. Головацький, <i>Електродинаміка</i> . Чернівці: Рута, 2011. 2. В. О. Іванов, Є. І. Габрусенко, Л. В. Сібрук, <i>Теорія електромагнітного поля</i> . Київ: НАУ, 2017. 3. А. М. Федорченко, <i>Теоретична фізика</i> , т. 1, 1988. 4. L. L. Deraad, K. A. Milton, J. Schwinger, and Wu-yang Tsai, <i>Classical Electrodynamics</i> . CRC Press, 2019. 5. J. D. Jackson, <i>Classical Electrodynamics</i> . 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.  <b>Допоміжна:</b> 1. М. В. Блажиєвська, О. І. Григорчак, Ю. С. Криницький та ін.; за ред. Ю. С. Криницького та А. А. Ровенчака, <i>Збірник задач з електродинаміки</i> . Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2015. 2. В. М. Мигаль, <i>Випромінювання електромагнітних хвиль</i> : Методичні вказівки до розв'язування задач з вибраних розділів електродинаміки для студентів III курсу фізичного факультету. Львів: ЛДУ, 1999. 3. В. В. Обуховський, <i>Збірка задач для контрольних робіт з електродинаміки</i> . Київ: Вид-во КНУ імені Тараса Шевченка, 2003.

	<p>4. A. Rovenchak, Yu. Krynytskyi. Radiation of the electromagnetic field beyond the dipole approximation. <i>Am. J. Phys.</i> 86(10): 727–732 (2018); <a href="https://doi.org/10.1119/1.5052427">https://doi.org/10.1119/1.5052427</a></p> <p><b>Інформаційні ресурси:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eric Weisstein’s World of Physics <a href="https://scienceworld.wolfram.com/physics/">https://scienceworld.wolfram.com/physics/</a></li> <li>2. Wikipedia. <a href="https://www.wikipedia.org">https://www.wikipedia.org</a></li> <li>3. The Feynman Lectures on Physics. Vol. II: The electromagnetic field. <a href="https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html">https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html</a></li> </ol>
<b>Тривалість курсу</b>	два семестри
<b>Обсяг курсу</b>	150 годин, з яких 96 годин аудиторних занять, з них 48 годин лекцій, 48 годин практичних занять, та 54 години самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p>ЗК 1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях</p> <p>ЗК 2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p>ЗК 9. Здатність працювати автономно.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i></p> <p>СК 5. Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп’ютерних технологій.</p> <p>СК 7. Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.</p> <p><i>Програмні результати навчання, на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></p> <p>ПРН 01. Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв’язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики.</p> <p>ПРН 02. Застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів.</p> <p>ПРН 03. Застосовувати ефективні технології, інструменти та методи експериментального дослідження властивостей речовин і матеріалів, включаючи наноматеріали, при розв’язанні практичних проблем прикладної фізики.</p> <p>ПРН 12. Розуміти закономірності розвитку прикладної фізики, її місце в розвитку техніки, технологій і суспільства, у тому числі в розв’язанні екологічних проблем.</p>
<b>Ключові слова</b>	Рівняння Максвелла; потенціали електромагнітного поля; умови випромінювання; релятивістська механіка; рівняння Максвелла–Лоренца
<b>Формат курсу</b>	Очний
<b>Теми</b>	Див. Табл. 1 Схема курсу
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Іспит у кінці VI семестру. Форма: Письмово-усний.
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують знань із таких дисциплін: математичний аналіз, векторний аналіз, диференціальні рівняння, механіка, електрика.
<b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b>	Презентація, лекції, розв’язування задач. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та рисунками.

<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп'ютер, загальноживані комп'ютерні програми й операційні системи, проєктор
<b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b>	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• робота на практичних заняттях під час семестру, 20% семестрової оцінки; максимальна кількість балів — 20 (10 балів (усереднена оцінка) за розв'язування задач біля дошки + 10 балів за роботу на практичних); кожна відповідь біля дошки оцінюється відповідно до такої 10-бальної шкали:       <ul style="list-style-type: none"> <li>9–10 — задача розв'язана повністю правильно;</li> <li>7–8 — розв'язок в основному правильний, є незначні технічні огріхи;</li> <li>5–6 — задача розв'язана частково;</li> <li>3–4 — записано лише кілька вихідних виразів;</li> <li>1–2 — записано лише один вихідний вираз;</li> <li>0 — відмова відповідати;</li> </ul> </li> <li>робота на практичних оцінюється так:       <ul style="list-style-type: none"> <li>9–10 — активна участь у 13–16 заняттях;</li> <li>7–8 — активна участь у 9–12 заняттях;</li> <li>5–6 — активна участь у 5–8 заняттях;</li> <li>1–4 — активна участь у 1–4 заняттях;</li> <li>0 — жодної активної участі в практичних заняттях;</li> </ul> </li> <li>• 2 контрольні роботи (на практичних заняттях): 30% семестрової оцінки; максимальна кількість балів — 30; кожна контрольна складається з трьох задач по 5 балів відповідно до такої шкали:       <ul style="list-style-type: none"> <li>5 — задача розв'язана повністю правильно;</li> <li>4 — розв'язок в основному правильний, є незначні технічні огріхи;</li> <li>3 — задача розв'язана частково;</li> <li>2 — записано лише кілька вихідних виразів;</li> <li>1 — записано лише один вихідний вираз;</li> <li>0 — розв'язок відсутній.</li> </ul> </li> <li>• результати іспиту: 50% підсумкової оцінки; максимальна кількість балів — 50:       <ul style="list-style-type: none"> <li>тестова частина — 30 балів (питання з варіантами вибору відповідей); два розширених теоретичних питання по 10 балів кожне відповідно до такої шкали:           <ul style="list-style-type: none"> <li>9–10 — студент повністю володіє матеріалом;</li> <li>6–8 — рівень володіння матеріалом достатній;</li> <li>3–5 — рівень володіння матеріалом частковий;</li> <li>1–2 — студент майже не володіє матеріалом;</li> <li>0 — відповідь відсутня.</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> <p>Підсумкова максимальна кількість балів — 100.</p> <p><b>Письмові роботи:</b> Очікується, що студенти виконають чотири контрольні роботи.</p> <p><b>Академічна доброчесність:</b> Очікується, що контрольні роботи студентів будуть оригінальними. Списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману.</p> <p><b>Відвідання занять</b> є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і практичні заняття курсу. Студенти</p>

	<p>мають інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися усіх строків, визначених для виконання усіх видів письмових робіт, передбачених курсом.</p> <p><b>Література.</b> Усю літературу, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надано викладачами виключно в освітніх цілях без права її передавання третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p><b>Політика виставлення балів.</b> Враховуються бали, набрані за роботу на практичних заняттях, контрольних роботах та на іспиті. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час заняття; недопустимість пропусків та запізнь на заняття; користування мобільним телефоном, планшетом чи іншими мобільними пристроями під час заняття в цілях, не пов'язаних із навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін.</p> <p>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p><b>Орієнтовний перелік питань на іспит</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Короткий історичний нарис розвитку електродинаміки.</li> <li>2. Рівняння Максвелла як узагальнення дослідних фактів.</li> <li>3. Математичний апарат електродинаміки: ряд Фур'є та інтегральне перетворення Фур'є; <math>\delta</math>-функція Дірака. Густина точкового заряду.</li> <li>4. Потенціали електромагнітного поля. Градієнтна інваріантність електромагнітного поля.</li> <li>5. Калібрування Кулона і Лоренца, рівняння Д'Аламбера. Поперечний струм.</li> <li>6. Рівняння неперервності. Закон збереження заряду.</li> <li>7. Закон збереження енергії. Умови випромінювання.</li> <li>8. Закон збереження імпульсу. Тензор напружень.</li> <li>9. Рівняння Максвелла для вільного поля. Плоскі, сферичні та інші хвилі.</li> <li>10. Закони збереження для вільного поля, енергія та імпульс поля.</li> <li>11. Рівняння для статичних полів. Розрахунок потенціалів і полів через густини зарядів і струмів.</li> <li>12. Мультипольні розвинення. Потенціали і поля електричного та магнітного диполів. Електричний квадрупольний момент.</li> <li>13. Потенціали Ліснара–Віхерта.</li> <li>14. Поле рухомого точкового заряду.</li> <li>15. Випромінювання точкового заряду.</li> <li>16. Сила радіаційного гальмування. Променисте тертя.</li> <li>17. Поле системи зарядів на великих віддальх від джерела, близька і хвильова зони.</li> <li>18. Дипольне і квадрупольне випромінювання.</li> <li>19. Перетворення Лоренца: формули Лоренца; додавання швидкостей; власний час і скорочення Лоренца; чотиривимірні вектори і тензори.</li> <li>20. Релятивістська механіка вільної частинки: інтеграл дії, функції Лагранжа та Гамільтона, 4-вектор енергії-імпульсу.</li> <li>21. Заряджена частинка в електромагнітному полі: функції Лагранжа і Гамільтона, рівняння руху.</li> <li>22. Варіаційний принцип для знаходження рівняння руху зарядженої частинки в просторі Мінковського.</li> </ol>

	<p>23. Тензор електромагнітного поля і його властивості; перетворення полів та інваріанти.</p> <p>24. Знаходження рівнянь Максвелла з варіаційного принципу.</p> <p>25. Мікро- та макрополя. Усереднення мікроскопічних рівнянь: середні значення мікроскопічних полів, зарядів, струмів.</p> <p>26. Вектори поляризації та намагнічення. Рівняння поля в середовищі.</p> <p>27. Поляризація і намагнічення середовища в постійних полях: неполярні і полярні середовища, поле в конденсованому середовищі.</p> <p>28. Умови на межі двох середовищ.</p> <p>29. Поляризація середовища у змінному полі.</p> <p>30. Комплексна діелектрична проникність, дисперсійні співвідношення.</p> <p>31. Типові задачі можна <a href="#">переглянути тут</a>.</p>
<b>Опитування</b>	<p>Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.</p>

## Схема курсу «Електродинаміка»

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
<b>Тема 1. Математичний апарат електродинаміки</b>			
1	<b>1. Вступ.</b> Короткий історичний нарис розвитку електродинаміки. Математичний апарат електродинаміки: елементи векторного числення.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
<b>Тема 2. Рівняння електродинаміки для зарядів і струмів у вакуумі</b>			
1	<b>2. Рівняння Максвелла як узагальнення дослідних фактів.</b> Закон Кулона; вихровий характер магнітного поля; закон Фарадея; джерела магнітного поля; закон Ерстеда; закон Ампера. Математичний апарат: $\delta$ -функція Дірака; густина точкового заряду.	Лекції — 1 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
2	<b>3. Потенціали електромагнітного поля.</b> Означення потенціалів, рівняння для потенціалів, градієнтна інваріантність електромагнітного поля, калібрування Кулона і Лоренца. Рівняння д'Аламбера. Поперечний струм.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
2	<b>4. Закони збереження.</b> Рівняння неперервності як форма запису закону збереження. Закон збереження заряду. Закон збереження енергії. Умови випромінювання.	Лекції — 1 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
3	<b>5. Закони збереження.</b> Закон збереження імпульсу. Тензор напружень.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
3	<b>6. Статичні поля у вакуумі.</b> Рівняння для статичних полів. Безпосереднє розв'язування рівнянь для потенціалів.	Лекції — 1 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
4	<b>7. Мультипольні розвинення.</b> Потенціали і поля електричного та магнітного диполів.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
4	<b>8. Мультипольні розвинення.</b> Електричний квадрупольний момент. Вищі мультипольні моменти. Приклади розрахунків мультипольних моментів.	Лекції — 1 год, практичні — 2 год ( <i>підсумкова к/р 1</i> ), самостійна робота — 2 год	1 тиждень
<b>Тема 3. Теорія випромінювання</b>			
5	<b>9. Вільне електромагнітне поле.</b> Рівняння Максвелла для вільного поля. Плоскі, сферичні та інші хвилі. Фазова та групова швидкості.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень

5	<b>10. Вільне електромагнітне поле.</b> Поляризація електромагнітних хвиль. Закони збереження для вільного поля, енергія та імпульс поля.	Лекції — 1 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
6	<b>11. Потенціали Лієнара–Віхерта.</b> Поле рухомого точкового заряду: особливості диференціювання потенціалів Лієнара–Віхерта, обчислення полів.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
6	<b>12. Поле і потенціали заряду, який рухається.</b> Випромінювання точкового заряду. Сила радіаційного гальмування. Променисте тертя.	Лекції — 1 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
7	<b>13. Поле системи зарядів на великих відстанях від джерела.</b> Близька і хвильова зони. Дипольне і квадрупольне випромінювання.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
<b>Тема 4. Теорія відносності. Коваріантна форма рівнянь електродинаміки</b>			
7	<b>14. Принципи відносності. Інтервал між подіями. Чотиривимірні простори Мінковського.</b> Перетворення Лоренца: формули Лоренца; додавання швидкостей; власний час і скорочення Лоренца; чотиривимірні вектори і тензори.	Лекції — 1 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
8	<b>15. Релятивістська механіка вільної частинки:</b> інтеграл дії, функції Лагранжа та Гамільтона, енергія й імпульс; 4-вектор енергії-імпульсу. Рівняння руху вільної частинки у формі Лагранжа–Ейлера, Гамільтона та Гамільтона–Якобі.	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
8	<b>16. Заряджена частинка в електромагнітному полі:</b> функції Лагранжа і Гамільтона, рівняння руху. 4-потенціали поля і закони їх перетворення.	Лекції — 1 год, практичні — 2 год ( <i>нідсумкова к/р 2</i> ), самостійна робота — 2 год	1 тиждень
9	<b>17. Тензор електромагнітного поля:</b> варіаційний принцип для знаходження рівняння руху зарядженої частинки в просторі Мінковського; тензор поля і його властивості; перетворення полів та інваріанти.	Лекції — 3 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 3 год	2 тижні
10	<b>18. Основні співвідношення електродинаміки у просторі Мінковського:</b> 4-форма рівнянь електродинаміки; варіаційний принцип в теорії поля; інтеграл дії для зарядів і поля; знаходження рівнянь Максвелла з варіаційного принципу.	Лекції — 3 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	2 тижні
11	<b>19. 4-форма законів збереження.</b> Тензор енергії-імпульсу. Рівняння Лоренца–Абрагама–Дірака	Лекції — 3 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 3 год	2 тижні



<b>Тема 5. Рівняння макроскопічної електродинаміки</b>			
12	<b>20. Мікро- та макрополя, мікроскопічні рівняння Максвелла–Лоренца.</b> Усреднення мікроскопічних рівнянь: середні значення мікроскопічних полів, зарядів, струмів. Вектори поляризації та намагнічення. Умови на межі двох середовищ.	Лекції — 3 год, практичні — 2 год (підсумкова к/р 3), самостійна робота — 2 год	2 тижні
13	<b>21. Поляризація і намагнічення середовища в постійних полях:</b> неполярні і полярні середовища, поле в конденсованому середовищі; діа- та парамагнетизм.	Лекції — 3 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 3 год	2 тижні
14	<b>22. Загальна характеристика матеріальних рівнянь.</b> <b>Статичні поля в середовищі.</b> Енергія поля в середовищі, індуковані заряди і струми, індуктивності. Сили в статичних полях.	Лекції — 3 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	2 тижні
<b>Тема 6. Поля, залежні від часу. Квазістатичні явища</b>			
15	<b>23. Поляризація середовища в змінному полі.</b> Комплексна діелектрична проникність, дисперсійні співвідношення. Дисперсні і прозорі середовища.	Лекції — 3 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 3 год	2 тижні
16	<b>24. Умови квазістатичності та рівняння квазістатичних явищ.</b> Нормальний та аномальний скін-ефекти.	Лекції — 3 год, практичні — 2 год (підсумкова к/р 4), самостійна робота — 2 год	2 тижні